

# 软 X 射线探测中阶梯型信号的处理电路设计与仿真

方腾飞 朱仁杰 郑博文 温昕澄 阴泽杰 徐修峰  
(核探测与核电子学国家重点实验室, 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

**摘要** 在软 X 射线能谱探测中, 采用硅漂移探测器(Silicon Drift Detector, SDD)与复位型电荷灵敏前置放大器集成的一体化探测设备, 其输出信号为包含射线能谱信息的阶梯型锯齿波。文章针对该设备产生的阶梯型锯齿波信号无法直接精确提取幅度信息的问题, 提出了一种用模拟电路对该信号进行整形放大处理的方案, 并通过 Cadence 软件仿真的方法, 探究了此方案的可行性以及在该方案下影响能谱能量分辨率的因素。文章还通过对比不同噪声幅度输入时电路的输出信号, 最终得到在相应的能量分辨率指标要求下前放输出信号噪声指标的最低要求。

**关键词** 硅漂移探测器; 阶梯型电压信号; 软 X 射线能谱; 信号成形

**中图分类号** TL814; TN710; TP391.9

软 X 射线(能量 1-20 keV) 能谱是目前先进全超导托卡马克装置(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)测量电子温度的常规诊断之一。最新发展的 SDD 相比传统的 Si(Li)探测器有着体积小、探测效率高、能量分辨率好等优点, 因此非常适合用在托卡马克装置上进行电子温度诊断<sup>[1]</sup>。系统工作时, 探测器阵列中的 SDD 探测到托卡马克窗口辐射出的特征 X 射线, 经内部集成的复位型电荷灵敏前置放大器, 输出包含 X 射线能谱信息的锯齿波信号, 利用示波器观测到的输出波形如图 1 所示。

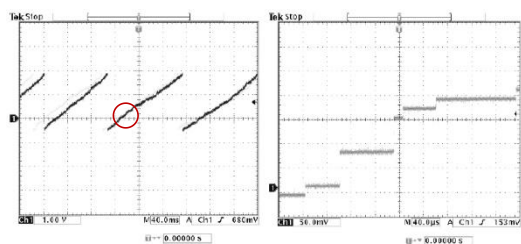


图 1 前放输出的阶梯型锯齿波信号  
Fig.1 Stepped sawtooth signal from the preamplifier

图 1 右中波形为左中圆圈内细节的放大, 其中包含 5.9 keV 和 22.1 keV 两种能量的输出, 每个软 X 射线会产生 3.7 mV/keV 的正向幅度。由于该信号为振幅约 2 V 的阶梯型锯齿波, 不能从中直接得到能谱, 因此需要

将该信号经前端信号调理单元进行初步整形、放大, 输出一定幅度的核脉冲信号后, 经高速 ADC 采样, 再利用 FPGA 进行数字滤波成形、基线恢复、堆积甄别以及幅度提取, 最终获取软 X 射线的能谱信息<sup>[2]</sup>。实际设计中对该系统的指标要求如表 1 所示。

表 1 指标要求  
Table 1 Indicator requirements

指标	数值
测量通道	20
能量探测范围/keV	1-20
能量分辨率/eV	$\leq 133@5.9 \text{ keV}$
辐射强度时间分辨/ms	0.5
电子温度时间分辨/ms	10-50
空间分辨率/cm	$\sim 2$

因此整套系统中的关键点之一, 就是如何由图 1 所示的阶梯型锯齿波信号整形得到一定幅度的单向核脉冲信号, 并尽可能地降低噪声影响, 使测得的能谱满足能量分辨率要求。

## 1 复位型电荷灵敏前置放大器

系统中用到的复位型电荷灵敏前置放大器电路示意图如图 2 所示, 在正常工作时,

该项工作受到国家自然科学基金(No. 11575184, No. 11975307)的资助

第一作者: 方腾飞, 男, 1995 年出生, 现为中国科学技术大学硕士研究生, 从事核电子学和核信息采集处理方向

通讯作者: 徐修峰, E-mail: xuxf@mail.ustc.edu.cn

探测器输出的电流脉冲  $I_D$  在反馈电容  $C_f$  上产生电荷累积, 每个脉冲信号  $I_D$  都会使输出端电平抬高相应幅度, 因此得到阶梯型的电压信号; 当电平达到一定幅度后, 驱动脉冲复位和脉冲抑制电路, 产生一个正脉冲信号, 使场效应管 Q 栅极电流  $I_g$  增加, 从而实现电容  $C_f$  上累积电荷的泄放, 因此前放输出的信号呈锯齿波。

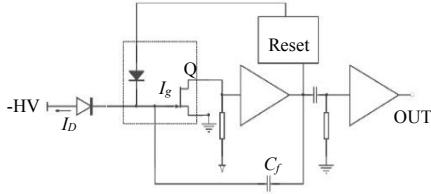


图2 复位型电荷灵敏前放电路示意图  
Fig.2 Schematic of the reset type charge sensitive preamplifier

目前系统中采用的复位型电荷灵敏前放的输出信号动态范围为 2 V, 可将每 1 keV 的射线能量输出为 3.7 mV 的电压幅度, 即产生一个 3.7 mV 的阶跃。

## 2 信号成形

### 2.1 微分电路

#### 2.1.1 微分电路基本原理

要实现将阶梯型信号转换为脉冲信号的功能, 通常采用微分的方法, 常用的改进型微分电路原理图如图 5(1)所示<sup>[3]</sup>, 其中微分电路的输出

$$V_2 = -R_1 C_f \frac{dV_1}{dt} \quad (1)$$

该部分电路的输出信号为输入电平信号的微分, 输出波形只反映输入波形的突变部分, 即只有输入波形发生突变的瞬间才有输出, 而对恒定部分则没有输出。在微分电路的输入回路中串联电阻  $R_3$ , 反馈回路中并联一个小电容  $C_f$ , 并尽量使  $R_3 C_f = R_1 C_1$ , 在正常工作频率中,  $R_3$ 、 $C_f$  对电路的影响可以忽略, 但在高频时,  $R_3$  和  $C_f$  的作用使得闭环放大倍数降低, 从而抑制了高频噪声, 同时  $R_1 C_f$  形成一个超前环节, 对相位进行补偿, 提高了电路的稳定性。

#### 2.1.2 微分电路仿真

利用 Cadence 软件中的 Stimulus Editor

功能可以创建自定义激励源, 以叠加了  $V_{pp}$  (峰-峰值) 5 mV 的高斯白噪声的阶梯型电压信号为例, 波形如图 3 中  $V_1$  所示, 该波形中有四个不同幅度的阶跃, 其中幅度最小的阶跃代表 1 keV 的射线输出(3.7 mV), 而幅度最大的阶跃则代表 20 keV 的射线输出(74 mV)。将该信号输入图 5(1)中进行仿真, 得到的输出信号  $V_2$  见图 3, 可以看出该微分电路实现了将阶梯型信号转化为负向脉冲信号的功能, 但由于  $V_2$  的噪声  $V_{pp}$  约 300 mV, 考虑到系统中不可避免的会存在噪声, 因此若要达到较高的能量分辨率, 还需要对  $V_2$  进行进一步的处理, 以降低噪声的影响。

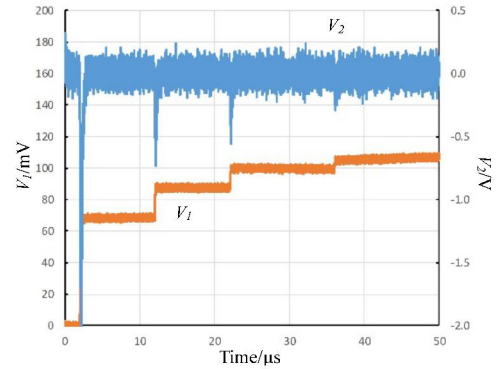


图3 输入仿真信号波形与微分电路输出信号  
Fig.3 Input simulation signal waveform and output signal from the differential circuit

### 2.2 积分电路

#### 2.2.1 积分电路基本原理

对于单向脉冲信号来说, 由于噪声的幅度通常是双向的, 因此可以采用积分的方法来进一步优化信噪比, 积分电路原理图如图 5(2)所示。其输出信号

$$V_3 = -\frac{1}{R_4 C_2} \int V_2 dt \quad (2)$$

(2)

即输出的电压信号  $V_3$  为输入信号  $V_2$  的积分。为了防止积分电容  $C_2$  饱和, 在反馈回路中并联一个泄放电阻  $R_2$ , 由于电阻并联在电容上, 无论电容上电压的正负,  $R_2$  都有使其变为 0 的作用, 这样就避免了电容电压的无休止增长或减小。但需要注意的是  $R_2$  的阻值不能过小, 否则积分器就不再是理想积分器, 而变成了一个低通滤波器<sup>[4]</sup>。

### 2.2.2 积分电路仿真

保持微分电路输入端的激励信号不变, 即仍为图 3 中的阶梯型电压信号  $V_1$ , 将微分电路得到的输出  $V_2$  作为积分电路的输入信号, 利用 Cadence 仿真得到的输出电压波形  $V_3$  如图 4 所示。由仿真结果可以得到该信号的噪声  $V_{pp}$  约 80 mV, 对比图 3 中  $V_2$  的 300 mV 的噪声  $V_{pp}$ , 可以看出经过积分电路后的输出信号噪声幅度较之微分电路有了明显的改善, 电路信噪比得到显著提高。

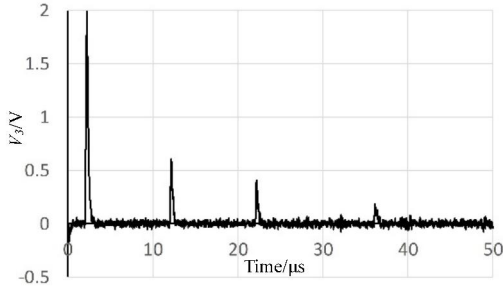


图 4 积分电路输出信号  
Fig.4 Output signal from the integral circuit

### 2.3 滤波电路

在传统的模拟核能谱测量系统中, 通常以 Sallen-Key(SK)电路实现核脉冲信号的高斯成形, 通过改变核脉冲信号的形状与幅度, 可以提高系统的信噪比<sup>[5]</sup>。为了进一步改善测得的软 X 射线能谱的能量分辨率, 在微分积分电路之后可以再加上一级 SK 型二阶低通有源滤波器来提高输出信号的信噪比, 其单位增益型电路如图 5(3)所示, 虽然从理论上来说  $C_3$ 、 $C_5$  可以任意取值, 但是考虑到低通滤波的截止频率  $f_c$ ,  $C_5$  一般按照与  $f_c$  的对应关系中的量级取值, 来避免  $R_5$  和  $R_6$  的电阻值过大或过小<sup>[6]</sup>。

若取  $R_5=R_6=R$ ,  $C_5=2C_3=2C$ , 即可得到 SK 型 4 元件巴特沃斯易用型电路, 根据其频域传递函数表达式

$$\dot{A}(j\omega)=1/(1+j\omega 2RC+(j\omega)^2 2C^2 R^2) \quad (3)$$

可得

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{2}RC}; \quad f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{2}RC};$$

$$\text{品质因数 } Q = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707;$$

因此在实际应用中可以通过改变  $R_5$ 、 $C_3$  的取值来改变此巴特沃斯型低通滤波器的截止频率, 以求达到最佳的滤波效果及能

量分辨率。

## 3 电路设计及仿真分析

### 3.1 原理图设计

综合以上分析, 在保证系统有较好的能量分辨率和简化电路的前提下, 软 X 射线信号整形电路的最终原理图设计如图 5 所示。

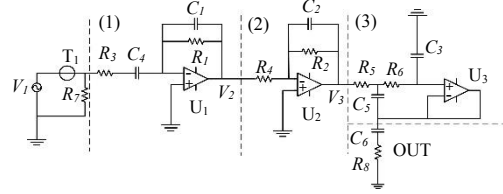


图 5 软 X 射线信号整形电路原理图  
Fig.5 Schematic of the shaping circuit for the soft X-ray signal

该电路主要由一级微分、积分以及二阶低通滤波电路构成, 其中  $R_7$  为 50  $\Omega$  的终端匹配电阻, 可以避免传输线  $T_1$  特征阻抗带来的影响。U<sub>1</sub>、U<sub>2</sub>、U<sub>3</sub> 分别为三个集成运放芯片,  $C_6$  为交流耦合电容,  $R_8$  为负载,  $V_1$  为自定义激励源。利用 MATLAB 产生一组叠加有不同幅度高斯白噪声的阶梯型锯齿波信号的数据, 代入  $V_1$  中修改其参数, 可以得到如图 6 中的  $V_1$  信号 (图 6 右为左中圆圈处波形放大), 该信号中每个阶跃的高度为 21.83 mV, 即由 5.9 keV 能量的软 X 射线产生的信号的正向幅度, 其上叠加的高斯白噪声  $V_{pp}$  值可以自行设置。该信号中的台阶每 2 V 便会复位一次, 用以模拟软 X 射线探测系统中由复位型电荷灵敏前放输出的电平信号。将图 6 中的激励信号输入到图 5 中的整形电路中, 经过仿真得到输出信号 OUT 处即  $R_8$  两端的电压数据, 再用算法处理从中提取出相应的峰值信息, 即可实现软 X 射线的能谱测量功能, 并能根据能谱的半高宽 (FWHM) 得到能量分辨率的信息。

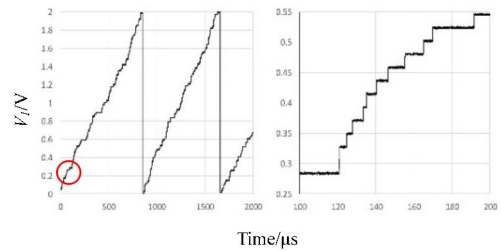


图 6  $V_1$  产生的激励信号

Fig.6 Excitation signal generated by  $V_I$

### 3.2 参数分析

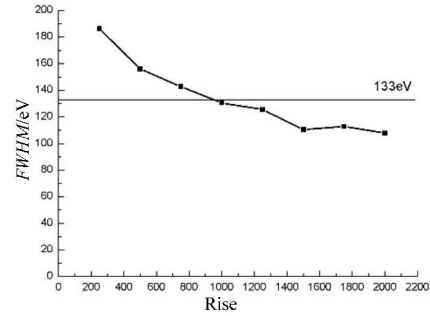
#### 3.2.1 低通滤波截止频率

正如 2.3 节中提到的, 通过改变  $R_5$ 、 $C_3$  的值可以改变低通滤波的截止频率, 为了分析截止频率与能量分辨率 (由于 5.9 keV 的能量对应的信号幅度即峰位是固定的, 因此可用能谱的半高宽表示) 的关系, 将激励信号  $V_I$  上叠加的高斯白噪声  $V_{pp}$  固定为 3.7 mV, 即系统要求测量到的最低能量 1 keV 所对应的阶跃幅度, 通过不同的  $R_5$ 、 $C_3$  取值来改变低通滤波的截止频率, 经过多组仿真对比得到的结果如图 7(1)所示。图 7(1)中横坐标为选取不同  $R_5$ 、 $C_3$  值设置的截止频率所对应的输出信号的上升时间 (对于模拟信号,  $F_{3dB} \approx 0.35/T_{rise}$ ,  $F_{3dB}$  代表模拟信号的 3dB 带宽,  $T_{rise}$  为上升时间)。考虑到半高宽小于等于 133 eV 的指标要求, 以及在计数率  $10^5$  cps 下, 过长的上升时间会导致输出信号的堆积, 根据图 7(1)中的结果, 选取  $T_{rise}=2000$  ns,  $R_5=R_6=128.6$  k $\Omega$ ,  $C_3=5$  pF,  $C_5=10$  pF 时, 可以得到较好的滤波效果及满足要求的能量分辨率。因此在信号噪声的  $V_{pp}$  不超过 3.7 mV 时, 上述整形电路可以满足能量分辨率小于等于 133 eV@5.9 keV 的指标要求。

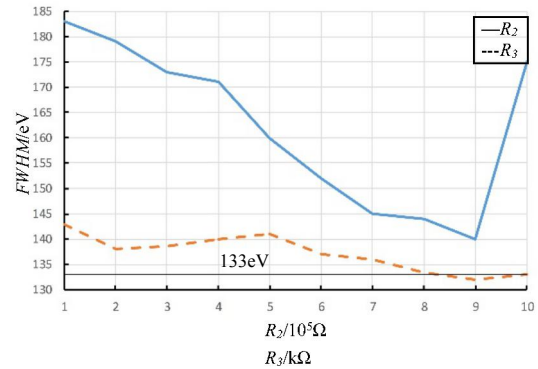
#### 3.2.2 积分电路泄放电阻

由于积分电路中, 泄放电阻的阻值越大, 所引起的噪声幅度越小, 但电阻阻值过大会导致电容上累积的电荷泄放过慢而引起堆积, 因此  $R_2$  的阻值也是影响能量分辨率的重要因素之一, 需要经过分析来确定最佳的泄放电阻阻值。提高激励信号  $V_I$  上叠加噪声的  $V_{pp}$  至 6 mV, 通过改变  $R_2$  的值, 观察由仿真输出信号经算法处理后得到的能量分辨率与  $R_2$  的关系, 如图 7(2)中实折线  $R_2$  所示, 其中横坐标为  $R_2$  的阻值, 纵坐标为处理后得到的能谱峰值处的半高宽。可见仿真结果与分析一致, 即随着电阻  $R_2$  阻值的增加噪声减小, 但达到一定阻值后, 若继续增加  $R_2$  则会引起输出脉冲更加严重的堆积, 使得能谱的能量分辨率变差, 如图 8 所示, 可以看到对于同样的两个时间间隔约 10  $\mu$ s 的脉冲,  $R_2$  取 1.1 M $\Omega$  时在脉冲的下降沿 25  $\mu$ s 处信号幅度较之 0.9 M $\Omega$  的波形有更加明显的堆积。

综合图 7(2)与图 8 可得, 在该整形电路的仿真结果中,  $R_2$  取 900 k $\Omega$  时系统的能谱半高宽最窄, 即能量分辨率也最好, 但没有达到小于等于 133 eV 的指标要求。



(1) 输出信号的上升时间与能谱半高宽  
(1) Relationship between the rise time of output signal and FWHM



(2)  $R_2$  ( $R_3$ ) 的阻值与能谱半高宽  
(2) Relationship between the value of  $R_2$  ( $R_3$ ) and FWHM

图 7 半高宽及其影响因素的关系曲线  
Fig.7 Relationship between FWHM and its influencing factors

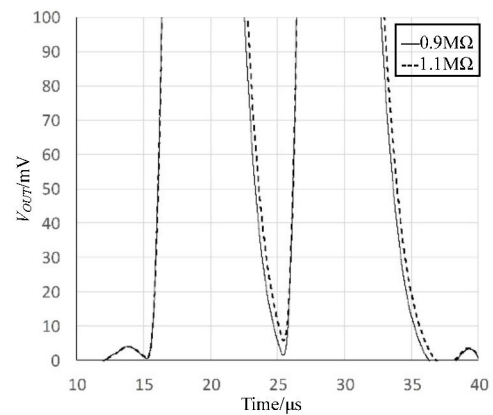


图 8 不同  $R_2$  下输出信号对比(0.9、1.1 M $\Omega$ )  
Fig.8 Comparison of the output signals at different  $R_2$  (0.9、1.1 M $\Omega$ )



### 3.2.3 微分电路串联电阻

在图 5 的微分电路部分,通过改变  $R_1C_1$  的值,可以改变第一级的放大倍数,从而影响整套系统的信噪比。由 2.1.1 节的结论可知,在满足  $R_3C_4=R_1C_1$  的条件下,由于实际应用中电容值不能任取,而电阻值选择较多,因此设  $C_1=1$  pF,  $C_4=100$  pF,通过选取不同的  $R_1$ 、 $R_3$  的值,来改变第一级微分电路的放大倍数,并观察其与能量分辨率的关系。将叠加噪声的  $V_{pp}$  值提高至 7 mV,利用仿真得到能谱半高宽与  $R_3$  阻值的关系如图 7(2) 中虚折线  $R_3$  所示。可见在噪声  $V_{pp}$  为 7 mV 时,通过改变  $R_1$ 、 $R_3$  的值可以使系统满足半高宽小于等于 133 eV 的要求,对比图 7(2) 中的实折线  $R_2$  展现的结果可以看出能量分辨率有了很大的改善,由图 7(2)得  $R_3=9$  k $\Omega$  时能量分辨率最好,此时  $R_1=900$  k $\Omega$ 。

## 4 结论

### 4.1 电路可行性分析

将以上分析所确定的器件参数,代入图 5 原理图中,同时为使输出信号动态范围为 2 V (ADC 的输入信号范围),调整参数为  $R_4=180$  k $\Omega$ ,  $C_2=2$  pF。将叠加有  $V_{pp}$  为 7 mV 的高斯白噪声的锯齿波信号作为其中的激励源  $V_I$ ,对整个电路进行仿真最终得到的输出波形如图 9 所示,其中图 9 左为 20 ms 长度的输出波形,由于输入信号为锯齿波,每隔一段时间会出现一次电压复位即电压向下的跃变,在仿真输出的波形中表现为负向的峰值;图 9 右为 1 ms 长度的输出波形,其中存在的较高幅度的脉冲是由输入信号中两个或多个阶跃相距较近或叠加在一起产生的,与 SDD 探测到的计数率有关。从输出波形中可以看到该电路实现了将复位型电荷灵敏前置放大器输出的阶梯型锯齿波信号转换为一定幅度的正向核脉冲信号的功能。

通过对输出信号进行后续处理提取其幅度信息进而可以得到软 X 射线的能谱如图 10 所示,横坐标为从输出信号中提取出的所有核脉冲的峰值幅度,纵坐标为每个幅度所对应的脉冲计数值。硅漂移探测器为半导体探测器,因此有

$$U = K e \frac{\Delta E}{W C_{det} t} \quad (4)$$

其中  $U$  为探测器输出电压,  $K$  是收集效率,  $e$  是电子电荷,  $W$  是产生一对电子空穴对所需的平均能量,  $C_{det}$  是探测器电容,  $\Delta E$  是带电粒子损失的能量。对于 X 射线,只要入射光子的射程小于探测器灵敏区的厚度,能量就会被完全收集,收集效率  $K$  为 1,因此探测器输出脉冲幅度与射线能量成线性关系<sup>[7]</sup>,能谱峰值对应的横坐标即为 5.9 keV 软 X 射线对应的脉冲信号峰值幅度,经过能谱的标定后也可由能谱的横坐标幅值推算出对应的软 X 射线的能量,可见此模拟电路用在软 X 射线能谱探测系统中的方案是可行的。

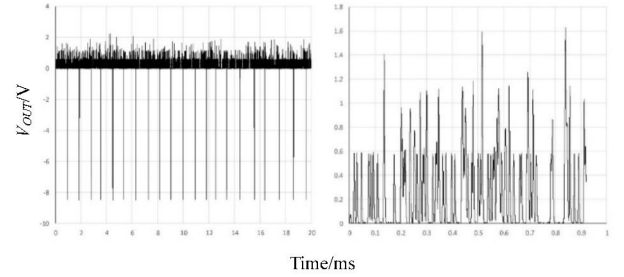


图 9 20 ms (左)与 1 ms (右)的仿真输出波形  
Fig.9 Simulated output waveform for 20 ms(left)and 1 ms(right)

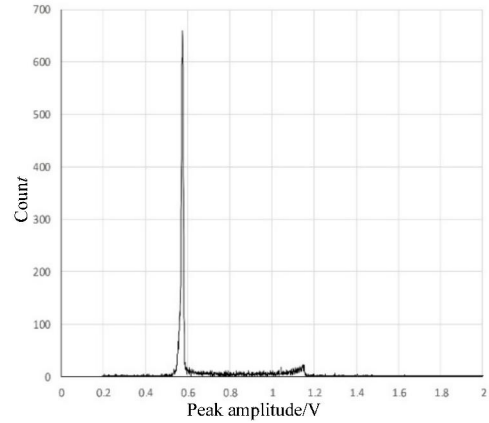


图 10 软 X 射线能谱  
Fig.10 Soft X-ray energy spectrum

### 4.2 噪声分析

在图 5 所示整形电路中,将激励源  $V_I$  上叠加的高斯白噪声逐渐由低至高设置成不同的  $V_{pp}$  值分别进行仿真,处理仿真输出的波形后分别得到相应的能量分辨率如图 11 所示,其中噪声  $V_{pp}$  取值范围为 3.7~10 mV。

由图 11 可知,随着输入信号中叠加的噪声幅度增加,能谱半高宽会随之展宽,即能量分辨率会随之变差。同时可以看出在噪声  $V_{pp}$  值不高于 7 mV 时,测得的能谱能够满足能量分辨率小于等于 133 eV @ 5.9 keV 的要求,即系统对 SDD 经复位型电荷灵敏前放输出的信号噪声  $V_{pp}$  要求不得高于 7 mV,此时信噪比  $SNR=20\lg(5.9\times3.7/7)\approx9.879$  dB。

因此在复位型电荷灵敏前置放大器输出信号的信噪比高于 10 dB 的前提下,即可采用文章中设计的信号整形电路进行处理,进而实现软 X 射线能谱探测的功能。

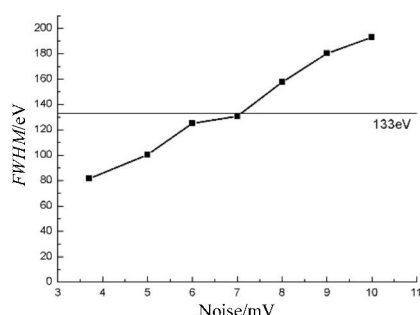


图 11 噪声  $V_{pp}$  值与能谱半高宽的关系曲线  
Fig.11 Relationship between the noise and FWHM

## 5 结语

在软 X 射线能谱探测中,对于复位型电荷灵敏前放输出的阶梯型锯齿波信号,若采用数字化的方法<sup>[8]</sup>,直接将前放输出的信号经过 ADC 转化为数字信号之后在数字电路系统中进行处理,在保证能谱分辨率的前提下,对 ADC 的采样率、位数和精度都有很高的要求。本文章设计的模拟电路,利用模拟的方法对前放输出的阶梯型锯齿波信号进行整形滤波,得到传统的模拟核脉冲信号,并通过电路仿真技术验证了此方案的可行性,本文探讨的模拟成形电路对于其它类似的核脉冲信号处理同样具有参考和借鉴价值。

## 6 参考文献

- 1 许平,林士耀,胡立群,等. EAST 全超导托卡马克上硅漂移探测器软 X 射线能谱诊断[J]. 原子能科学技术, 2010, **44**(6): 757-763  
XU Ping, LIN Shiyao, HU Liqun, *et al.* Diagnostic of soft X-ray energy spectrum based

- on silicon drift detector in EAST fully-superconducting tokamak[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, **44**(6): 757-763
- 2 蒋连军,梁飞,唐世彪,等. 基于 USB2.0 新型分时多道脉冲幅度分析系统研制[J]. 核电子学与探测技术, 2010, **30**(6): 771-778  
JIANG Lianjun, LIANG Fei, TANG Shibiao, *et al.* Development of time-sharing multi-channel pulse amplitude analyzer based on USB2.0[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, **30**(6): 771-778
- 3 张陶. 一种基于微分法的峰值检测电路[J]. 微电子学, 2017, **47**(4): 537-541  
ZHANG Tao. A peak detector based on differential method[J]. Microelectronics, 2017, **47**(4): 537-541
- 4 YANG Jianguo. New Concept Analog Circuits [M/OL]. : <https://www.analog.com/cn/landing-pages/002/yang-e-book.html>, 2019-11-10, 288-290
- 5 李卓岱,张怀强,刘进洋,颜苗苗. 数字核脉冲信号高斯成形方法实现与对比分析[J]. 核技术, 2019, **42**(6): 060403-1-060403-5  
LI Zhuodai, ZHANG Huaiqiang, LIU Jinyang, YAN Miaomiao. Implementation and analysis of Gaussian shaping method for digital nuclear pulse signal[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(6): 060403-1-060403-5
- 6 YANG Jianguo. New Concept Analog Circuits [M/OL]. : <https://www.analog.com/cn/landing-pages/002/yang-e-book.html>, 2019-11-10, 453-456
- 7 汪晓莲,李澄,邵明. 粒子探测技术[M]. 安徽:中国科学技术大学出版社, 2009: 220-221  
WANG Xiaolian, LI Cheng, SHAO Ming. Particle detection technology[M]. Anhui: University of Science and Technology of China Press, 2009: 220-221
- 8 张怀强,颜苗苗,刘进洋. 核脉冲信号滤波成形电路的数字化研究[J]. 核技术, 2019, **42**(7): 070402-1-070402-6  
ZHANG Huaiqiang, YAN Miaomiao, LIU Jinyang. Digitalization of filter shaping circuit for nuclear pulse signal[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(7): 070402-1-070402-6

# Design and simulation of shaping circuit for stepped signal in soft X-ray detection

FANG Tengfei ZHU Renjie ZHENG Bowen WEN Xincheng YIN Zejie XU Xiufeng

*(State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)*

**Abstract Background:** In the detection of soft X-ray energy spectrum, integrated detection device integrated with a silicon drift detector (SDD) and a reset type charge sensitive preamplifier, the output signal is a stepped sawtooth wave containing ray energy spectrum information.

**Purpose:** Processing the sawtooth signal to obtain the X-ray energy spectrum. **Methods:** To design an analog circuit for shaping and amplifying the stepped sawtooth signal from the preamplifier by Cadence simulation. **Results:** Realize the function of transforming stepped sawtooth signals into nuclear pulse signals. Analysis of several factors affecting energy resolution under this schematic. **Conclusions:** The feasibility of the circuit is verified, and the factors affecting the energy resolution of the energy spectrum and the minimum requirements on the noise amplitude at the output of the preamplifier are obtained.

**Keywords** SDD, Stepped voltage signal, Soft X-ray energy spectrum, Signal shaping

**CLC** TL814, TN710, TP391.9